DOI: 10.13873/J.1000-9787(2015)09-0087-03

基于 PSD 的高精度太阳敏感器电子学系统设计

朱龙飞[1,2]，陈　鼎[1]，桑　鹏[1]，李保权[1]

(1. 中国科学院 复杂航天系统电子信息技术重点实验室，中国科学院 空间科学与应用研究中心，北京 100190;
2. 中国科学院大学，北京 100190)

摘　要: 针对目前国内太阳观测成像仪器稳像系统的需要，提出了一种基于位置敏感探测器(PSD)的高精度太阳敏感器电子学系统的设计，有针对性地提出了提高灵敏度的设计方案和降低系统噪声的具体措施。该系统噪声水平低于 4 nA，在工作范围中心区域具备了 0.3″的高分辨能力，可以配合偏摆镜结构组成稳像系统，服务于夸父和 SPORT 计划等具有高分辨率成像需求的太阳成像仪器。

关键词: 太阳成像; 稳像; 位置敏感探测器; 高精度太阳敏感器

中图分类号: TP212　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-9787(2015)09-0087-03

Design of electronics system for high precision sun sensor based on PSD

ZHU Long-fei[1,2], CHEN Ding[1], SANG Peng[1], LI Bao-quan[1]

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, CSSAR, Chinese Academy and Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To meet the needs of image stabilization system of domestic solar observatory imaging instrument, a position sensitive detector(PSD)-based electronics system design for high-precision sun sensor is proposed. Concrete measures are put forward to improve the sensitivity and reduce system noise. At presemt, level of the system noise is lower than 4 nA, and has high resolving power of 0.3″ in center area of working scope, can cooperate with tip-tilt mirror to make up this system image stabilization system, which serve for Kua Fu and SPORT project and other solar imaging instruments which has high resolution imaging demand.

Key words: solar imaging; image stabilization; position sensitive detector(PSD); high-precision sun sensor

0　引　言

随着国内空间科学的发展，一大批高分辨率的太阳成像仪器，如极紫外成像仪[1]、日冕成像、日球成像、磁场成像等仪器，正在展开技术攻关，中国科学院也正在开展夸父和 SPORT 等太阳观测卫星的研制任务。这些仪器的分辨率设计指标均要求达到国际先进水平，但国内卫星平台自身的姿态控制系统难以满足其成像的稳定度指标需求。

国际上成熟的解决方案是使用独立的稳像系统，以确保可以获得高分辨率的太阳观测图像。目前，美国主导研制的多颗太阳观测卫星，如 SOHO，TRACE，STEREO，SDO 等，均搭载了独立的高精度稳像系统。独立的稳像系统保证了这些太阳观测卫星的成像精度，基本上都已经达到角秒级别[2~4]。

独立的稳像系统的一个重要组成部分是太阳敏感器，太阳敏感器可以迅速计算出太阳视线与太阳观测成像系统光轴之间的夹角，提供给稳像系统，用以对成像光路进行调整，提高成像的精度和分辨率。若开发出高精度的太阳敏感器，则可以显著提高仪器搭载稳像系统的分辨率与精度。

太阳敏感器的电子学系统设计的质量直接影响稳像系统的分辨率和灵敏度。同时，位置敏感探测器(position sensitive detector，PSD)作为一种响应速度快、位置分辨率高、光谱响应范围宽的位置敏感器件，其在精太阳敏感器中的应用在国内还是空白。本文提出了一种基于 PSD 的高精度太阳敏感器电子学系统设计方案，并且有针对性地给出了提高灵敏度的设计方案和降低系统噪声的具体措施，使其能够满足高性能稳像系统原理样机的需求，服务于夸父和 SPORT 等太阳观测卫星高分辨稳像需要。

收稿日期: 2015-01-16

1 位置敏感探测原理

系统的位置敏感探测原理如图1所示，X-Y 是 PSD 所在平面，经过透镜滤波和聚焦的太阳光，在四象限 PSD 上形成一个合适大小的光斑，太阳光线垂直于 PSD 平面入射时，光斑位于 PSD 正中心，那么，四象限的电流值是相同的; 如果太阳入射光路偏离垂直方向，则光斑的位置就会发生偏移，相应的，各个象限的电流就会发生改变。

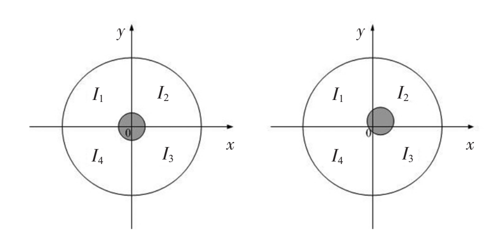


图1 太阳光斑在 PSD 上位移示意图

Fig 1 Displacement diagram of solar facula on PSD

因此，可以根据电流的变化计算出光斑在四象限 PSD 上的位置，经典的计算方法如式(1)、式(2)所示

$$X = k\frac{(I_1+I_2)-(I_3+I_4)}{I_1+I_2+I_3+I_4}, \quad (1)$$

$$Y = k\frac{(I_3+I_2)-(I_1+I_4)}{I_1+I_2+I_3+I_4}. \quad (2)$$

其中，I_1，I_2，I_3，I_4 为 PSD 四个相互独立的象限输出的光电流值(以左上角为起始，顺时针方向)。k 值可以通过模拟太阳照射在 PSD 上进行光斑位移测试得到一个拟合值。因此，只要通过合适的电子学系统检测出 PSD 四个象限输出的电流值大小，就可以计算出太阳光斑在 PSD 的位置，进而提供太阳照射角度的信号。

2 高灵敏度电子学系统设计

传统的 PSD 信号处理电路大多是模拟式的，由运算放大器实现和差运算，由模拟除法器实现除法运算，最终得到与位置信号呈比例的电压信号。这种模拟式 PSD 信号处理器具有处理速度快的优点，但却不能通用，即由于不同结构 PSD 的位置公式不同，必须匹配不同运算功能的处理器[2]。因此，本文提出了一种通过运放实现信号采集，通过 AD 实现信号转换的通用型 PSD 信号处理电路。该电路具有较高的位移探测灵敏度，可以对 PSD 输出信号进行精确处理和运算，实现对太阳偏移角度的精确测量，为稳像系统提供图像偏移误差信号。

其电子学系统设计如图2所示，电子学系统由四部分组成，分别是信号获取电路、信号转换电路、数字信号处理电路以及输入输出接口模块。

2.1 信号获取电路

由于 PSD 输出的光电流为 μA 级别，信号太弱不适合直接采样输出，故在信号获取阶段，需采用具有电流/电压转换和放大功能的电路，对信号进行放大，以保证信号采样输出的准确性。图3为 PSD 光电流转换和放大电路原理图。

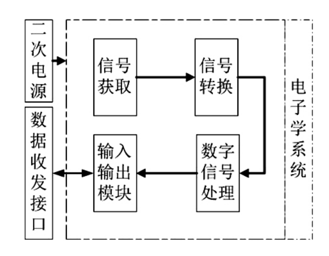


图2 电子学系统结构图

Fig 2 Structure diagram of electronics system

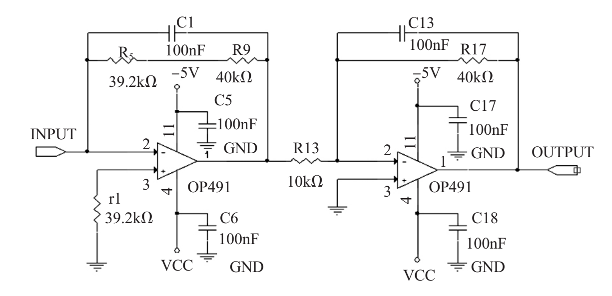


图3 信号获取电路原理图

Fig 3 Principle diagram of signal acquisition circuit

PSD 四象限输出为 μA 级信号，需要分辨精度为 nA 级别，故采用了输入偏置电流为 15 pA 的精密跨阻放大器 OP497，该放大器输出噪声峰峰值为亚 μV 级，将光电流信号转换为电压信号; 主放大器采用输出噪声峰峰值为 μV 级的微功耗放大器 OP491，将电压信号进一步放大到便于 A/D 转换模块采集的范围内。两级放大均采用一片集成4路放大器，以减少 PSD 四路输出信号的传导误差。

2.2 信号转换电路

经过计算分析，基于 PSD 的高精度太阳敏感器为了实现1″的测量精度，其电子学部分应实现至少 6 nA 的光电流分辨能力，6 nA 信号经放大电路后到达 A/D 转换器时为 0.94 mV。

为提高电子学的分辨能力，A/D 转换电路部分采用16位的低功耗 A/D 转换器 AD7980，单电源 2.5 V 供电，参考电压为 5 V; 图4为 AD7980 在 5 V 参考电压下采样中心值时的输出信号分布直方图，由此可见其输出噪声为 ±3 LSB，而电路要求的最低分辨能力根据公式(3)计算得出，为 12 LSB，可见此 A/D 满足电路系统对于分辨能力的要求

$$\frac{0.94\ \text{mV}}{5\ \text{V}} \times 2^{16} = 12\ . \quad (3)$$

3 噪声抑制措施

3.1 稳压电源

在电路初期调试阶段，AD7980 的参考电压 VR 与电路的供电电源 VCC 是同一路电源，在测试中发现参考电压随着输入增大而变得不稳定，输入 16 μA 时，参考电压

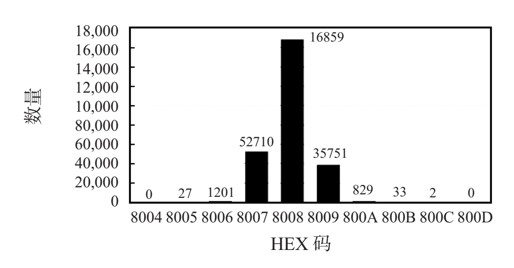


图 4　AD7980 采样输出直方图

Fig 4　Histogram of AD7980 sampling output

噪声的峰峰值达到 1 mV，导致了数字信号转换的精度降低，因而，采用独立的稳压电源芯片来输出 AD7980 的参考电压 VR。

本设计选取的稳压源芯片，其输出值的 0 ~ 12 Hz 峰峰值噪声只有 8 μV，远远低于 VR 与 VCC 共用时的峰峰值 1 mV。当电路输入电流在 16 μA 时，通过公式(4)比较可以得出，稳压芯片对于 A/D 转换的噪声贡献小于 0.054(HEX 值)，远远低于电路分辨能力所要求的 12，即

$$\frac{2.58}{5}\times 2^{16}-\frac{2.58}{5.000008}\times 2^{16}<0.054\ . \tag{4}$$

3.2　AD7980 电磁环境改善

使用高精度稳压源芯片之后，导致了较大的噪声干扰，影响了稳压源芯片的输出，因而，将晶振周围的铜皮和稳压源芯片周围的铜皮隔开，避免了地电平不稳导致的噪声传播。

针对 AD7980 基准电压输入 REF 具有的动态输入阻抗，进行去耦，为使寄生电感最小，最理想的实现方法是将基准电压源的去耦陶瓷电容器正对 REF 和 GND 引脚放置，并用较宽的低阻抗走线进行连接。同样，AD7980 的电源 VDD 和 VIO 的去耦电容器，也应尽量靠近 AD7980 放置，并用短而宽的走线连接，以提供低阻抗路径并减小电源线路上的毛刺噪声影响。因而，在电路中将原本摆放在其周围的去耦电容器安装在芯片背面，并通过短而宽的走线或铺铜与管脚相连，从而改善了数字信号转换中的噪声状况。

4　实验测试

在硬件调试初期，为了验证电路噪声性能和灵敏度，采用电流源直接接入放大模块模拟光电流对电路性能进行仿真测试。采用 Keithley 6220 型精密直流电源作为模拟源进行仿真实验，模拟光电流输入，由于 PSD 光电流输出在 0 ~ 25.8 μA 范围内变化，故采用电流源的 20 μA 量程范围；在该量程范围内，电流源的最小调整精度为 1 nA，峰峰值噪声为 2 nA。

在测试阶段，首先进行噪声分析。选取 1 ~ 16，20，25 μA共 18 个输入值进行测试。测试结果如图 5 所示。由数据可知，除个别测试值(8，16，25 μA)外，系统输出电流数值的峰峰值仅有 3.3 nA，最大的峰峰值出现在输入 8 μA 的时候，为 3.8 nA，输入 16，25 μA 时，峰峰值为 3.7 nA。

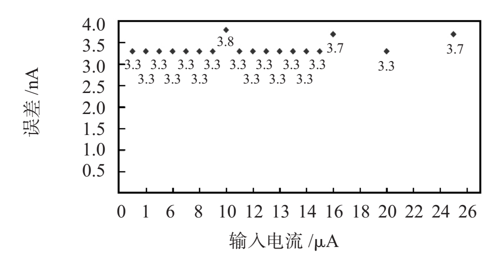


图 5　输出与输入光电流误差值分布

Fig 5　Distrubution of photo current error value between inputs and outputs

在随后进行的分辨率测试中，依然选取 1 ~ 16，20，25 μA共 18 个输入值进行测试。每个采样值测试时都会加上 3 nA 的跳变，测试电路的分辨能力。结果显示，对于各个采样值，3 nA 的输入跳变都是可以被分辨出来的。其中一个值的测试结果如图 6 所示。

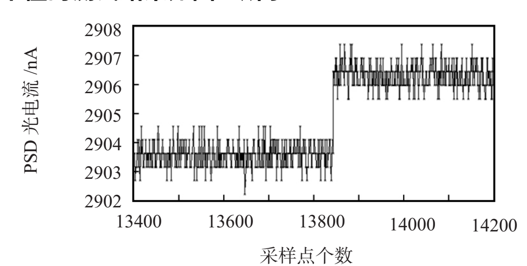


图 6　3 nA 分辨率测试结果

Fig 6　Test result of 3nA resolution

根据 PSD 的响应曲线可以计算出，3 nA 的分辨率等价于光斑在 PSD 中心位置沿坐标轴移动 0.165 μm 可被分辨。光学系统设计中，成像透镜焦距为 107.6 mm，那么根据公式(5)计算可以得出，角分辨率在中心位置可以达到 0.3″

$$107.6\ \tan\frac{x}{3600}=0.165\ \mu\mathrm{m}\ . \tag{5}$$

5　结　论

目前，通过本文所述的技术手段和噪声抑制措施，高精度太阳敏感器的电子学系统配合摆镜结构组成稳像系统，并已经实现了 PSD 中心位置 0.3″的高分辨率，电路噪声也降低到最高只有 3.8 nA，能够配合摆镜结构组成稳像系统，并服务于夸父和 SPORT 工程的太阳成像设备中，同时也可以满足其他太阳成像观测仪器的高分辨率需求。

参考文献：

[1] Li Baoquan，Zhu Guangwu，Wang Shijin，et al. The solar X-EUV imaging telescope [J]. Chinese Journal of Geophysics，2005，48(2)：235－242.

[2] Delaboundiniere J P，Arizner G E，Brunaud J，et al. EIT extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO mission [J]. Solar Physics，1995，162：291－312.

[3] Kaiser M L，Kucera T A，Davila J M，et al. The STEREO mission：An introduction [J]. Space Sci Rev，2008，136：5－16.

(下转第 93 页)

固定电位差，约 300 mV，对它们之间的电位差进行补偿，即可得到本系统测出的钢筋腐蚀程度判定标定。

表 1　腐蚀电位评估钢筋腐蚀状态的标准

Tab 1　Criteria for corrosion potential to evaluate corrosion state of reinforcement

腐蚀电位/mV	腐蚀概率
> -126	<10 %
-126～-276	不确定
< -276	>90%
< -426	非常严重

注：表中电位水平为采用饱和甘汞作参比电极时的测量值

4.2　测试方法与仪器

实验过程中除了通过在混凝土试件中埋设钢筋腐蚀监测探头进行测试外，还要使用 PS-6 型钢筋腐蚀测定仪进行测试，以钢筋腐蚀测定仪测试的结果作为参考。

4.3　测试结果与分析

按照上述测试方案进行实验，测试时温度控制在 20 ℃左右。由于钢筋锈蚀速度比较缓慢，因此，每隔 5 d 用本文介绍的方法和钢筋测定仪分别测试一次混凝土试件中钢筋的腐蚀电位。测试结果数据如表 2，从测试结果可知，通过埋设钢筋腐蚀监测探头测得的电位值变化与钢筋腐蚀测定仪测得的电位变化趋势基本一致，两种方法测得的电位值相差不大。由于混凝土结构中钢筋的腐蚀速度很缓慢，短时间内钢筋仍处于轻度锈蚀状态。

表 2　试件腐蚀电位测试结果

Tab 2　Results of specimens corrosion potential test

时间(d)	参比电极测试电位(mV)	Ps-6 测试电位(mV)
0	-230	-209
5	-226	-208
10	-240	-219
15	-248	-230
20	-239	-228
25	-251	-241
30	-265	-239
35	-272	-251
40	-284	-267
45	-296	-260
50	-303	-272
55	-341	-278
60	-362	-285
65	-358	-293
70	-376	-308

5　结　论

本文将 WSNs 技术应用在混凝土钢筋腐蚀度监测中，可以提高混凝土结构中钢筋腐蚀检测的效率，能对大体积混凝土结构建筑进行实时、连续、无线监测，自动采集钢筋腐蚀度的参数，并对采集的数据进行实时处理和存储。工作人员在远程监测中心可以直接查看历史数据和钢筋腐蚀变化曲线，且钢筋腐蚀概率在不同水平时，上位机界面将有不同颜色的警示灯闪烁，以提醒工作人员，实时监测钢筋腐蚀度，为评估大型混凝土结构的耐久性提供重要的依据。

参考文献：

[1] 康旻楠. 钢筋混凝土的钢筋腐蚀现状调查与原因探究[J]. 科技与企业，2013(8)：147-148.

[2] 熊传胜，蒋林华，王维春，等. 混凝土中钢筋腐蚀实时监测研究现状及展望[J]. 材料导报 A，2012，26(6)：102-103.

[3] 杨桂新，吴　瑾，吴文操. 混凝土结构中钢筋腐蚀监测无线传感器[J]. 仪器仪表学报，2009，30(6)：1153-1155.

[4] 李善仓，张克旺. 无线传感器网络原理与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2008：216-217.

[5] 高秀利，周华新，刘建忠. 结构混凝土钢筋腐蚀电位原位监测系统研究[J]. 江苏建筑，2011(1)：105-106.

[6] 李新慧，俞阿龙，潘　苗. 基于 CC2530 的水产养殖监控系统的设计[J]. 传感器与微系统，2013，32(3)：85-86.

[7] 杨维卫，俞阿龙，贾芳芳，等. 基于 WSNs 和移动 Agent 的桥梁健康监测研究[J]. 传感器与微系统，2013，32(12)：80-81.

[8] 赵海贤. 可调太阳能充电器的设计[J]. 电源技术应用，2012(9)：63-64.

[9] 刘全信. 基于 Zig Bee 技术的养殖信息监控系统的研究与实现[D]. 济南：山东科技大学，2012：40-42.

作者简介：

王　袁(1990-)，女，江苏淮安人，硕士研究生，主要研究方向为无线传感器与智能系统。

(上接第 89 页)

[4] Handy B N，Acton L W，Kankelborg C C，et al. The transition region and coronal exporer[J]. Solar Physics，1999，187：229-260.

[5] Boerner Paul，Edwards Christopher，Lemen James，et al. Initial calibration of the atmospheric imaging assembly(AIA) on the solar dynamics observatory(SDO)[J]. Solar Physics，2012，275：41-66.

[6] 曾　超，李　锋，徐向东. 光电位置传感器 PSD 特性及其应用[J]. 光学仪器，2002，24(4/5)：82-85.

[7] Gérard Thuillier，Steven Dewitte，Werner Schmutz. Simultaneous measurement of the total solar irradiance and solar diameter by the PICARD mission[J]. Advances in Space Research，2006，38：1792-1806.

[8] 施隆照，黄梅珍，杨小玲，等. 二维位置敏感探测器及信号处理器[J]. 传感器技术，2002，21(8)：20-22.

作者简介：

朱龙飞(1988-)，男，陕西汉中人，硕士研究生，主要从事低噪声小信号电子学系统设计方向的研究。